

· 综述 ·

## 光纤 Sagnac 环的研究现状及其应用

郭安华, 张帆, 杨俊杰, 贾国栋, 马小贞

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 在研究 Sagnac 效应的基础上, 利用光纤 Sagnac 环的干涉结构, 提出了多种光纤 Sagnac 环的改进方案, 并进行了大量实验, 使其应用范围得到了极大扩充。从 Sagnac 效应的基本原理出发, 综述了光纤 Sagnac 环现阶段的主要应用和最新进展, 主要有光纤陀螺、光纤水听器和 Sagnac 环滤波器等。最后介绍了光纤 Sagnac 环研究的前沿新技术方向, 主要包括改变 Sagnac 环的结构、在 Sagnac 环中加入介质或与其他结构级联、做成全光缓存器, 制作多波长光纤激光器等。

**关键词:** 光纤 Sagnac 环; Sagnac 效应; 光纤陀螺; 光纤水听器

中图分类号: TP212.44

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-06-0018-05

## Research and Application of Optical Fiber Sagnac Loop

GUO An-hua, ZHANG Fan, YANG Jun-jie, JIA Guo-dong, MA Xiao-zhen

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** According to the research on Sagnac effect and the interference structure of fiber Sagnac loop, the improved schemes of fiber Sagnac loop are introduced in recent years. The plenty of experiments are implemented and the application range is enlarged greatly. Based on the basic principle of Sagnac effect, the main applications and newest developments of fiber Sagnac loop at present stage such as fiber gyro, fiber hydrophone and Sagnac loop filter are summarized. The advanced and new technology directions of fiber Sagnac loop such as changing the structure of Sagnac loop, adding medium to Sagnac loop, cascading with other structure, making full-light cache and multiple-wavelength fiber lasers are introduced finally.

**Key words:** fiber Sagnac loop; Sagnac effect; fiber gyro; fiber hydrophone

光纤传感器发展于20世纪70年代,因其具有高灵敏度、高绝缘度、抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘等优点,受到越来越多的关注,并取得了突飞猛进的发展。Sagnac提出Sagnac效应并进行了一系列实验之后,人们在其基础上制作了光纤Sagnac环,并将其用在光纤传感领域,常被用来进行温度、应变、角速度等的传感,这些主要利用了其干涉结构。传统的Sagnac干涉环多用于制作光纤陀螺,随着光纤传感技术的发展,光纤Sagnac环越来越多的被应用到其他领域中,如光纤声传感器、梳状滤波器等。近年来,

许多学者通过改变Sagnac环的结构或嵌入其他介质,使其应用更加广泛。

### 1 Sagnac效应基本原理

1913年,法国科学家Sagnac首次提出了Sagnac效应,并进行了实验验证。图1为Sagnac发明的可以旋转的环形干涉仪,将同一光源发出的两束光分成两束,使其在干涉仪中相向传输一周以后会合并产生干涉,若环路平面内有旋转角速度,将在屏幕内看

收稿日期: 2013-08-18

基金项目: 高等学校博士学科点青年教师专项科研基金(20100009120002)资助项目

作者简介: 郭安华(1985-),男,湖南郴州人,北京交通大学硕士研究生,主要从事光纤传感、光电子器件的研究。

到移动的干涉条纹。Sagnac 指出,条纹移动数与干涉仪的角速度及环路所围的面积成正比。这就是 Sagnac 效应,随着光线传感技术的发展,Sagnac 效应在传感领域中的应用越来越广泛。

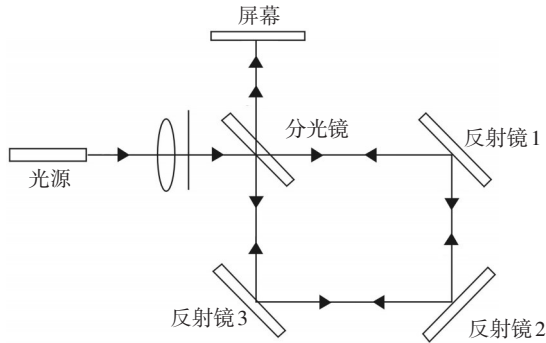


图1 Sagnac发明的环形干涉仪

光纤 Sagnac 干涉环基于 Sagnac 效应,图2为用光耦合器制作成的 Sagnac 干涉仪示意图,用长为  $L$  的光纤绕成半径为  $R$  的光纤圈,用耦合器将光纤环的两端连接起来即可。由于这类光干涉仪没有活动部件,没有非线性效应和低转速时激光陀螺的闭锁区,因而非常有希望制成高性能低成本的器件。入射光经光耦合器后分成两束后各自在环中绕一周后仍在光纤耦合器处相遇并发生干涉。相向传输的两束光是被透射还是被反射,由它们的相对相位决定。如果采用 3 dB 耦合器,入射光将被全部反射,此时 Sagnac 环相当于一个全反镜。

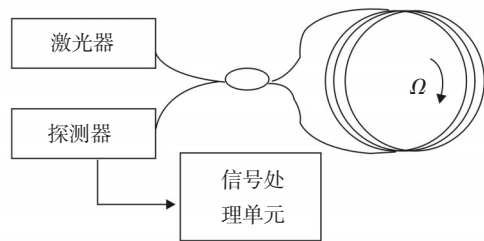


图2 光纤 Sagnac 环

当环形光路相对于惯性空间有一转动  $\Omega$  时(设  $\Omega$  垂直于环路平面),则对于顺、逆时针传播的光,将产生一非互易的光程差

$$\Delta L = \frac{4A}{c} \Omega \quad (1)$$

其中,  $A$  是环形光路的面积;  $c$  为真空中的光速。

当环形光路由  $n$  圈单模光纤组成时,对应顺、逆时针光速之间的相位差为

$$\Delta \varphi = \frac{8\pi n A}{\lambda c} \Omega \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  为真空中波长。

## 2 光纤 Sagnac 环应用

### 2.1 光纤陀螺

基于 Sagnac 效应的光纤 Sagnac 环首先被用于光纤陀螺中。光纤陀螺仪(OFG)实际上是一种 Sagnac 干涉仪,是一种新型的陀螺,目前已成为航空航天领域中最成熟的光纤传感器产品,并成为下一代的主要惯性传感器。1976年,美国犹他大学的 Victor Vali 和 Richard W. Shorthill 首次在实验室内演示了光纤陀螺原理,标志着光纤陀螺的诞生。现代陀螺仪包括干涉式陀螺仪和谐振式陀螺仪,而干涉型陀螺仪又有开环和闭环两种类型,它们的设计依据都是 Sagnac 的理论。光纤陀螺具有体积小、质量轻、精度极高、寿命长、可靠性好、响应速度快,并且不易受电磁和振动的影响等诸多优点,使其在航空航天,汽车的定位导航,机载系统和惯性制导等领域得到了广泛的应用。

从 20 世纪 90 年代开始,国外光纤陀螺就开始逐步进入产业化发展阶段,可实现批量生产。具有规模生产能力的光纤陀螺制造商主要分布在美国、德国、法国,美国在光纤陀螺领域一直保持着领先地位。如美国诺斯罗普公司生产的 IMU200 由三个光纤陀螺与三个石英加速度计构成,主要应用于高可靠性导弹武器系统;关键性能参数为光纤陀螺精度  $0.5$  ( $^{\circ}$ )/h ( $1\sigma$ ),标度因数精度  $100 \times 10^{-6}$ ,体积  $4.5 \text{ in} \times 4.5 \text{ in} \times 3.5 \text{ in}$ ,质量  $2.9 \text{ lb}$ ,功耗小于  $10 \text{ W}$ <sup>[1]</sup>。

推广干涉型光纤陀螺技术(IFOG)应用的最大挑战之一是成本问题。IFOG 中使用了大量的保偏光纤(PMF)。国外在 20 世纪 80 年代就已经掀起了 PMF 的研究与应用高潮,国内虽也在 20 世纪 80 年代就开始 PMF 的研究,但由于技术落后,保偏产品至今无法满足需求。现在国外在 PMF 生产和应用领域已相当成熟,而国内相同产品的性能指标和国外相比仍旧有很大差距,这也成为我国光纤传感技术和惯导技术发展的最大障碍。在光纤陀螺及光纤水听器研制过程中,保偏光纤起着举足轻重的作用,并可用于军用惯导和声呐,属于高科技产品,因而保偏光纤一直被西方发达国家对我禁运的清单。消偏技术对高性能的 IFOG 来说,具有极大的吸引力,为了使消偏陀螺技术达到导航级的性能,必须解决一些关键技术。

纵观光纤陀螺 30 多年来的发展,其在技术上已经取得了长足的进步,中低端的产品已经实现产业化,以后将主要面向高精度和低成本的光纤陀螺。国内的相关产品仍然与国际先进水平有很大差距,但近年来发展势头迅猛,有望在短期内实现技术突破。

## 2.2 光纤 Sagnac 环滤波器

在传感领域,光纤 Sagnac 环作为其中重要器件,具有制作简单,灵敏度高且与输入光的偏振态无关等优点。光纤 Sagnac 环还可以做成光纤滤波器,具有性能稳定、结构简单、便于调节通道间隔等优点。图 3 显示了在现代光通信系统中光滤波器的典型应用。在 Sagnac 环中加入啁啾光纤光栅或者均匀光纤布拉格光栅,经过耦合器分成相向传输的两束光会被光纤光栅反射,由光纤耦合器的两臂长差引起的相位差会使被反射的光在耦合器处相遇并产生干涉。

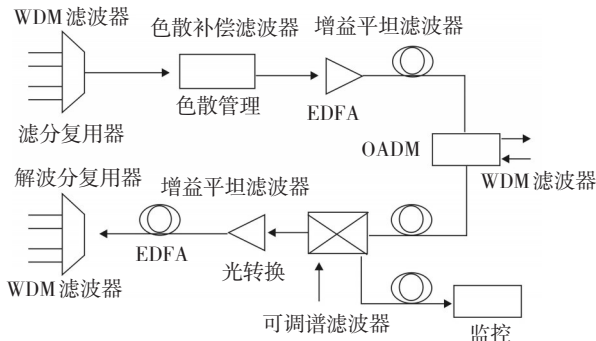


图3 光纤通信系统中光滤波器的应用

1987年,K.O.Hill等为了构成窄带滤波器,首次提出将光纤布拉格光栅加入 Sagnac 环中,并获得了成功<sup>[2]</sup>。2000年,舒学文等<sup>[3]</sup>详细阐述了含有线性啁啾光纤光栅及均匀光纤布拉格光栅的 Sagnac 环,并利用 Jones 矩阵详细分析了其透射谱。2003年,钱景仁等<sup>[4]</sup>对含有光纤光栅的 Sagnac 环进行了理论分析并进行了相关实验,他指出此结构能把光栅的带阻特性转换成带通特性,并可以进行传感。

近年来,许多学者都提出了梳状滤波器结构,主要有取样光纤光栅(SFBG)<sup>[5]</sup>, Fabry-Perot 滤波器<sup>[6]</sup>, Mach-Zehnder 干涉仪型以及 Sagnac 环状结构<sup>[7-9]</sup>,国内 Sagnac 环的最新研究主要有利用对称啁啾光纤光栅以实现大带宽<sup>[10]</sup>和利用高双折射光纤环级联实现中心波长的可调谐。此外,还有许多类似结构,如在

Sagnac 环中嵌入 Sinc 函数采样布拉格光栅、啁啾采样布拉格光栅等。也可以嵌入高双折射光纤构成梳状滤波器。

由于单个均匀光纤光栅 Sagnac 环信道隔离度差,王巍等<sup>[11]</sup>提出了级联 Sagnac 环组成梳状滤波器的思想。对于三阶 Sagnac 环级联,实现了通道间隔为 0.8 nm/FWHM 为 0.1 nm 的梳状滤波器,在相同信道间隔下使得 FWHM 降低为单环的 1/4,提高了系统信道隔离度。图 4 为级联 Sagnac 滤波器,ISO 为隔离器,用来防止下级环的反射光干扰上级环。可以推得,级联 Sagnac 环的透射率为各单环的透射率之积。

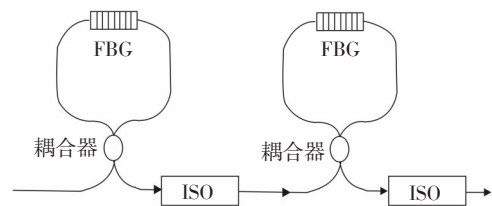


图4 光纤光栅 Sagnac 环级联

## 2.3 光纤水听器

Sagnac 光纤声传感器是建立在 Sagnac 效应原理基础上的相位调制功能型光纤声传感器,现已广泛应用于医疗、航空、军事及能源等方面,具有广阔的发展前景。1983年 E.Udd 指出,用 Sagnac 光纤干涉仪可以用来检测声信号。1989年, K.Kjell 等人通过实验证明了 Sagnac 水听器具有非常优越的性能。2003年, June-Ho Lee 等<sup>[12]</sup>提出一种利用 Sagnac 干涉仪制作的系统对水下超声波进行了定位,并成功进行了实验。2007年,王鑫等<sup>[13]</sup>经过研究表明, Sagnac 光纤水听器的声压相位灵敏度具有周期性,其周期与延时光纤的长度正相关,灵敏度高与探头的光纤长度正相关。为 Sagnac 光纤水听器的研究奠定了理论基础,并具有很强的指导意义。

按照原理的不同,光纤水听器可以分为:强度型、干涉型和光栅型。目前,国内外研究较多的水听器是 March-Zehnder 干涉仪型和 Michelson 干涉仪型,但由于他们在外界干扰下极易导致信号衰落,为了解决此问题,人们提出了多种解决方案,但成本较高,无法进行大规模商用。Sagnac 干涉仪型光纤水听器具有便于抑制温度带来的信号衰落,适于水下声传感等特点<sup>[14]</sup>,也越来越受到人们的重视,其原理图如图 5 所示,核心部分为一个光纤 3×3 耦合器组成的

Sagnac 环,当水声场对光纤 Sagnac 环产生影响时,相向传播的光路信号的互易性被打破,导致两束光相移不同,从而产生非互易性相位差,通过对回到耦合器的干涉信号进行解调可以得到声信号。同时,Sagnac 光纤水听器也存在不足,主要有:(1)灵敏度比 March-Zehnder 干涉仪型低;(2)若需提高其灵敏度则需加数公里的延时光纤。

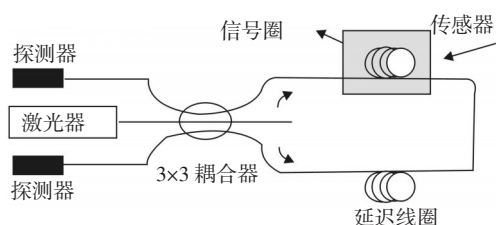


图5 Sagnac型光纤水听器原理图

国内对于光纤水听器的研究还很少报道(最早见于王小宁等<sup>[15]</sup>的理论研究)尤其是SSA(光纤水听器阵列)几乎是空白。可以预见,进行Sagnac环光纤水听器及SSA研究对于推动我国价格低廉、灵敏度高的光纤水听器阵列发展极其重要,并具有极其广阔的发展前景。

### 3 光纤 Sagnac 环最新技术进展

Sagnac 干涉仪具有零光程差,不存在干涉两臂不等引起的噪声,并且对相干光源要求较低,可使用宽带光源,也适合于扰动检测,制作成光缆识别器,国内已有大量成熟成品。在光纤 Sagnac 环中加入不同的介质,它将会有不同的输出特性,也会具有加入介质的某些特性。利用这些特点,可以制作出温度、应变、折射率传感器。甚至可以实现对其中的两个参数同时测量。在光纤 Sagnac 环的最新研究与应用中,主要有 Sagnac 环级联,在 Sagnac 环中嵌入光纤光栅,用保偏光纤做成保偏 Sagnac 环等。

2006年,O.Fraza<sup>[16]</sup>将高双折射光纤和长周期光纤光栅同时加入到 Sagnac 环中,实现了温度和应变的区分测量,其最大误差分别为  $\pm 21 \mu\epsilon$  和  $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 。

2008年,Jianqiang Li<sup>[17]</sup>利用 Sagnac 环的超宽带光脉冲生成结构,该结构利用了频率到强度映射实现了正负极性的超宽带脉冲生成。其中包含了一个电光相位调制器(EOPM)和嵌入了另一个 EOPM 的光纤 Sagnac 环构成的可调谐梳状滤波器。

全光缓存器可以在光域内对数据包进行缓存,现已成为全光包交换网络中的关键器件,利用光纤 Sagnac 环状结构制作全光缓存器已成为当前全光网络的研究热点。目前,国内外有许多类似报道<sup>[18-20]</sup>。图6为一个双环耦合全光缓存器示意图,若把图中非线性元件 SOA 用一定长度的光纤替代,利用光纤交叉相位调制实现光信号的“读写”,再在环中嵌入一个双向 EDFA 来补偿,这样可以构成以光纤为非线性元件的双环耦合全光缓存器。

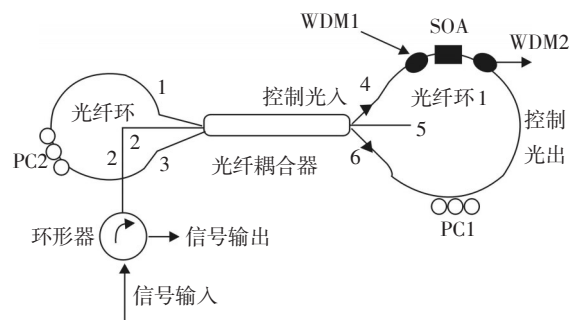


图6 双环耦合全光缓存器

2009年,冯素春等<sup>[21]</sup>利用 PMFBG、两段掺铒光纤环和 Sagnac 环组成了四波长激光器结构,直接写在保偏光敏上的光纤布拉格光栅作为波长选择器,实现了多波长掺铒激光器的制作。此光纤激光器具有工作原理简单、结构简单、性能稳定等优点,其结构图如图7所示。

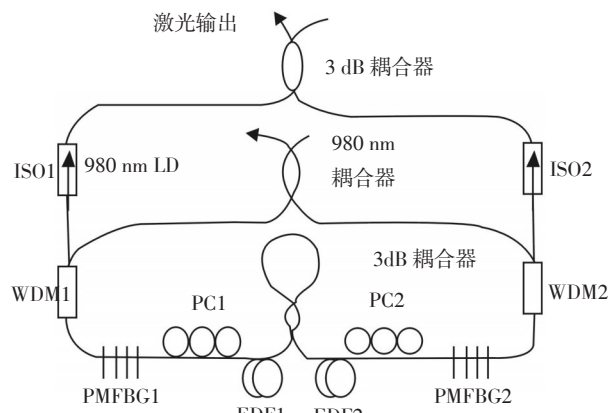


图7 四波长激光器结构图

2012年,邵敏等<sup>[22]</sup>把长周期光纤光栅嵌入保偏光纤做成的 Sagnac 环中,实现了温度和折射率的双参数测量,温度灵敏度和折射率灵敏度分别为  $0.1286 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  和  $49.38 \text{ dB}/\text{RIU}$ ,具有极好的应用前景。

近年来,Sagnac 型光纤传感器的应用领域再次被扩大,有报道利用 Sagnac 环梳状透射谱,做成 WDM

中的多波长激光器甚至通过引入不同参数FBG进行波长选择,还有光纤周界系统、地震检测、基于Sagnac干涉仪的全光异或门、Sagnac温度计等,其发展之迅速,前景之诱人让众多学者相继投入研究。

#### 4 总结与展望

光纤Sagnac环结构简单,性能稳定,应用领域越来越广泛。Sagnac干涉型光纤传感器在石油管道、扰动定位、化工检测、电力、通信等领域应用前景诱人,对它的研究具有重要意义。Sagnac环干涉仪不仅可以用来制作光纤陀螺,而且可以用来测量非对称的互易性信号,并作为一种光纤水听器的设计方案。光纤陀螺和Sagnac型光纤水听器作为高科技产品,已被许多国家军方列为重点研究项目,而我国在这方面的研究因为起步较晚,相对落后。光纤Sagnac环性滤波器是光纤Sagnac环应用的重要方面,因其具有梳状滤波和可调谐性等优点,常被用在光纤多波长激光器中。

在未来光纤Sagnac干涉仪的研究上,一些关键技术,如绕环技术、偏振控制、信号检测、特种光纤研制等仍旧是重点,诸如利用Sagnac环制作光缓存器和激光器等也将成为重点研究方向。

#### 参考文献

- [1] 王巍.光纤陀螺惯性系统[M].北京:中国宇航出版社,2010.
- [2] 赵金婷.光纤光栅传感及Sagnac环关键技术的研究[D].天津:天津理工大学,2010.
- [3] 叔学文,黄德修,邓桂华.基于单个光纤光栅的Sagnac干涉仪的理论及实验研究[J].物理学报,2000,49(9):1731-1735.
- [4] 钱景仁,梁明.光纤光栅Sagnac环特性及包络带通滤波器的研究[J].中国激光,2003,30(2):159-162.
- [5] ZOU Xi-hua, PAN Wei, LUO Bin, et al. Periodically chirped sampled fiber Bragg gratings for multichannel comb filters[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2006, 18(12): 1371-1373.
- [6] Menard M, Kirk A G Integrated Fabry-Perot comb filters for optical space switching[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(5): 768-775.
- [7] Vazquez C, Vargas S E, Pena J, et al. Sagnac loop in ring resonators for tunable optical filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(8): 2555-2567.
- [8] WANG Xu-de, LI Su-wen. Design of flat-top comb filter based on photonic crystal fiber Sagnac loop[C]// Communications and Photonics Conference and Exhibition, ACP. Asia. 2011: 1-7.
- [9] SUN Xiao-meng, ZHOU Lin-jie, XIE Jing-ya, et al. Tunable silicon comb filters based on Fabry-Perot resonators formed by Sagnac loop mirrors[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013: 1-3.
- [10] 曾春红,孔梅,张健.带有对称啁啾光纤光栅的Sagnac环滤波器[J].光子学报,2008,37(4):652-656.
- [11] 王巍,杨铿,安友伟,等.光纤光栅Sagnac环级联特性[J].红外与激光工程,2013,42(2):465-469.
- [12] June-Ho Lee, Dae-Yong Shin, Tae-Ho Kwon, et al. Ultrasonic location using the Sagnac interferometric optical fiber sensor in underwater[C]// Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 7th International Conference on. 2003, 1: 475-478.
- [13] 王鑫.Sagnac光纤水听器研究[D].长沙:国防科技大学,2007.
- [14] Culshaw B. The optical fiber Sagnac interferometer:an overview of its principles and applications[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17: 1-16.
- [15] 王小宁,王光明. Sagnac效应在光纤水听器中的应用[J].应用声学,1995,15(5):20-23.
- [16] Frazao O, Marques L M, Santos S, et al. Simultaneous measurement for strain and temperature based on a long-period grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2006, 18(22): 2407-2409.
- [17] LI Jian-qiang, XU Kun, FU Song-nian, et al. Photonic polarity-switchable ultra-wideband pulse generation using a tunable sagnac interferometer comb filter[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2008, 20(15): 1320-1322.
- [18] Aiming Liu, WU Chong-qing, GONG Yan-dong, et al. Dual-loop optical buffer (DLOB) based on a 3 &times; 3 col-linear fiber coupler[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2004, 16(9): 2129-2131.
- [19] LI Ya-jie, WU Chong-qing, FU Song-nian, et al. Power equalization for SOA-based dual-loop optical buffer by optical control pulse optimization[J]. Journal of Quantum Electronics, IEEE, 2007, 43(6): 508-516.
- [20] FU Song-nian, Shum P, Zhang L, et al. Design of SOA-based dual-loop optical buffer with a 3 &times; 3 col-linear coupler: guideline and optimizations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(7): 2768-2778.
- [21] 冯素春,许殿,鲁韶华,等.基于保偏光纤光栅的对称腔多波长掺铒光纤激光器[J].中国激光,2009,36(7):1886-1889.
- [22] 邵敏,乔学光,傅海威.基于长周期光纤光栅和Sagnac环的温度和折射率的区分测量[J].光电子·激光,2012,23(8):1442-1446.